

Desempenho funcional, estrutural e de segurança viária de um pavimento rodoviário construído com resíduos reciclados de ardósia ao longo de três anos

O presente artigo tem por objetivo apresentar o desempenho funcional, estrutural e de segurança viária de uma pista em trecho rodoviário experimental, construído no Distrito de Vargem Grande, município de Papagaios, MG. O pavimento foi construído com resíduos reciclados de ardósia, material alternativo, ambientalmente inerte, empregado nas camadas reforço do subleito, sub-base, base e revestimento, e com especial atenção para última, em concreto asfáltico (CA), por ser a camada mais nobre. O desempenho da pista do trecho experimental teve como base metodológica a avaliação funcional, estrutural, mecânica e de segurança contra a derrapagem. A avaliação funcional foi realizada por meio da determinação do Índice de Gravidade Global (IGG). Para avaliação estrutural, não destrutiva, foi utilizado o equipamento FWD, para estimar o módulo resiliente de cada uma das camadas do pavimento. E para a avaliação estrutural destrutiva, foi utilizado o equipamento sonda rotativa, que permitiu a retirada de corpos de prova da camada de revestimento, e do qual foram observadas a estrutura do esqueleto mineral das misturas asfálticas pesquisadas e aplicadas em campo. A segurança viária foi verificada por meio de ensaios de campo que avaliam a micro e a macrotextura do revestimento asfáltico. Com relação aos agregados britados de ardósia, os resultados dos ensaios de caracterização foram promissores, pois esses não sofreram quebra, esmagamento ou fendilhamento pela ação do tráfego, embora tenham natureza lamelar; mostraram-se também com boa adesividade para uso em mistura asfáltica a quente (concreto asfáltico). O estado da pista como um todo, pelo baixo número de defeitos constatados, teve avaliação correspondente a "ótima", pelo IGG (Índice de Gravidade Geral), não tendo sido observado comprometimento da pista para o usuário, quanto à derrapagem. Diante dos resultados obtidos, o emprego de agregados reciclados de ardósia utilizados nesta pesquisa apresentou resultados satisfatórios, e espera-se que seu uso seja cada vez mais incentivado em obras de pavimentação rodoviária, uma vez que, pelo alto consumo desses resíduos em obras lineares, essa providência concorrerá para a sustentabilidade ambiental e fomentará o emprego e a renda na região da extração da rocha.

Palavras-chave: Resíduos Reciclados de Ardósia; Sustentabilidade Ambiental; Mecânica de Pavimentos; MeDiNa.

Functional, structural and road safety performance of a road pavement built with recycled slate waste over three years

The following article aims to present the functional, structural and road safety performance of an experimental 263m long stretch of road, built in the Vargem Grande District, municipality of Papagaios, MG. The pavement was built with crushed slate aggregates, an alternative material, environmentally inert, used in the reinforcement layers of the subgrade, sub-base, base and covering, and with special attention to the last one, in asphalt concrete (AC), as it is the most noble. The performance of the track of the experimental section was based on methodological basis of functional, structural, mechanical and safety against skidding assessments. The functional evaluation was performed by determining the Global Severity Index (IGG). For structural, non-destructive evaluation, the FWD equipment was used to estimate the resilient module of each pavement layers. And for structural, destructive evaluation, the rotary probe equipment was used, which allowed the removal of specimens from the coating layer, and from which the structure of the mineral skeleton of the asphalt mixtures researched and applied in the field was observed. Road safety was verified through field tests that evaluate the micro and macro texture of the asphalt coating. Regarding crushed slate aggregates, the results of the characterization tests were promising, as they did not suffer breakage, crushing or cracking due to traffic, although they have a lamellar nature; they also showed good adhesion for use in hot asphalt mix (asphalt concrete). The condition of the track as a whole, due to the low number of defects found, had an evaluation corresponding to the "excellent", according to the IGG (General Severity Index), with no impairment of the track for the user regarding skidding. In view of the results obtained, the use of recycled slate residues used in this research has presented satisfactory results and it is expected that its use will be increasingly encouraged in paving works, due to its high consumption of aggregates (waste), it contributes to environmental sustainability and foster employment and income for the rock extraction region.

Keywords: Slate residues; Environmental sustainability; Pavement mechanics; MeDiNa.

Topic: Engenharia Ambiental

Received: 06/04/2021

Approved: 27/04/2021

Reviewed anonymously in the process of blind peer.

Marco Antônio das Graças Antunes 
Universidade Federal de Ouro Preto, Brasil
<http://lattes.cnpq.br/3577873653663308>
<http://orcid.org/0000-0002-8208-2577>
marcoantonioantunes56@gmail.com

Antônio Carlos Rodrigues Guimarães 
Instituto Militar de Engenharia, Brasil
<http://lattes.cnpq.br/8890983301899546>
<http://orcid.org/0000-0001-9244-7034>
guimaraes@ime.br

Geraldo Luciano de Oliveira Marques 
Universidade Federal de Juiz de Fora, Brasil
<http://lattes.cnpq.br/4503245454189660>
<http://orcid.org/0000-0003-1347-2624>
geraldo.marques@uff.edu.br

Marcos Lamha Rocha 
Universidade Federal do Rio de Janeiro, Brasil
<http://lattes.cnpq.br/0684505688946214>
<http://orcid.org/0000-0002-0581-9176>
marcoslr94@gmail.com



DOI: 10.6008/CBPC2179-6858.2021.004.0029

Referencing this:

ANTUNES, M. A. G.; GUIMARÃES, A. C. R.; ROCHA, M. L.. Desempenho funcional, estrutural e de segurança viária de um pavimento rodoviário construído com resíduos reciclados de ardósia ao longo de três anos. *Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais*, v.12, n.4, p.364-381, 2021. DOI: <http://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2021.004.0029>

INTRODUÇÃO

O processo de urbanização e adensamento populacional histórico, intensificado pós-revolução industrial, demandou e ainda demanda a utilização de recursos naturais finitos. Pelo descontrole da extração desses recursos e descarte irregular dos resíduos, ao longo dos anos, o meio ambiente sofreu severas perdas, como extinção de espécies, perda acentuada da cobertura vegetal natural, entre outros desastres provocados pelas atividades humanas descontroladas. Com o intuito de mitigar os impactos ambientais, convenções, tratados e legislações foram discutidas em âmbito internacional, marcadas quase sempre, após um grande desastre causado pelo homem, como exemplo o fim da segunda guerra mundial.

No Brasil o processo de urbanização, marcado, sobretudo, a partir do êxodo rural, no ano de 1950, demandou a utilização de materiais de construção. Com o processo de interiorização da capital e com o projeto do presidente Juscelino Kubitschek de avanço da infraestrutura nacional, essa demanda foi acentuada, dando destaque para a construção de rodovias federais, em todas as direções do país. Por possuir dimensões continentais, 8.515.759,09km², ficando em 5º lugar em extensão territorial no mundo, a necessidade de pavimentação e manutenção dessas vias têm sido responsáveis pela intensa quantidade de matérias-primas consumidas, o que gera recorrentemente passivos ambientais, muitas vezes com disposição inadequada, sem o devido controle e segurança imprescindíveis à saúde ambiental. Diante disso, medidas que visam à redução, reutilização e reciclagem dessas matérias vêm ganhando destaque no cenário atual.

Em relação às matérias-primas, primárias e secundárias, os autores Hendriks et al. (2007) asseveram que as primeiras são de origem natural e homogêneas em sua composição. Como exemplo, citam os materiais areia, brita, argila, petróleo, lã, algodão, madeira e o minério; que, por apresentarem homogeneidade, quando integram algum processo produtivo o fazem mediante operações preliminares relativamente simples. Por sua vez, as matérias-primas secundárias são os materiais recuperados, reutilizáveis, os quais não são predominantemente homogêneos e seu aproveitamento somente é possível mediante um tratamento elaborado, uma vez que são em geral produtos descartáveis, constituindo-se por agrupamentos de substâncias em geral muito complexas.

Os principais benefícios esperados com uso de materiais alternativos na construção, resíduos de outros processos industriais, em relação aos tradicionais, é a redução da demanda por agregados minerais; dos custos com energia e transporte para extração; dos custos ambientais associados à exploração de jazidas; diminuição dos problemas ambientais e econômicos associados ao armazenamento e disposição ambientalmente correta de resíduos; e agregação de valor a esses resíduos, até então sem finalidade econômica Nunes et al. (1996).

Silva (2017) e Saraiva (2006) argumentam que os agregados alternativos, com inserção regional, podem substituir satisfatoriamente os tradicionais em estruturas de pavimento viário, mesmo não se enquadrando completamente nas normativas convencionalmente seguidas pelo sistema rodoviário. Sob aplicação metódica de processos e tecnologias adequados (como reciclagem, por exemplo) pode tornar esses resíduos atrativos sob o aspecto econômico, além de contribuir para a redução de passivos ambientais

gerados com a exploração dos materiais de uso corrente.

O presente artigo tem por objetivo apresentar o desempenho funcional, estrutural e de segurança contra derrapagem de uma pista, em trecho rodoviário experimental, com 263 metros de extensão, integrante de uma alça viária, construído no município de Papagaios (o maior produtor de ardósia do país), região central de Minas Gerais. O pavimento foi construído com emprego de agregados britados de ardósia, material alternativo, ambientalmente inerte, nas camadas reforço do subleito, sub-base, base e revestimento, e com especial atenção para última, em concreto asfáltico (CA), por ser a camada nobre do pavimento. Os tipos de veículos que circulam diariamente no referido trecho são automóveis, ônibus, utilitários, caminhões e semirreboques. O trecho avaliado está localizado na Rua Dona Benedita, Distrito de Vargem Grande, Município de Papagaios, MG, sendo acessado diretamente pela rodovia estadual MG 423, conforme Figura 1.

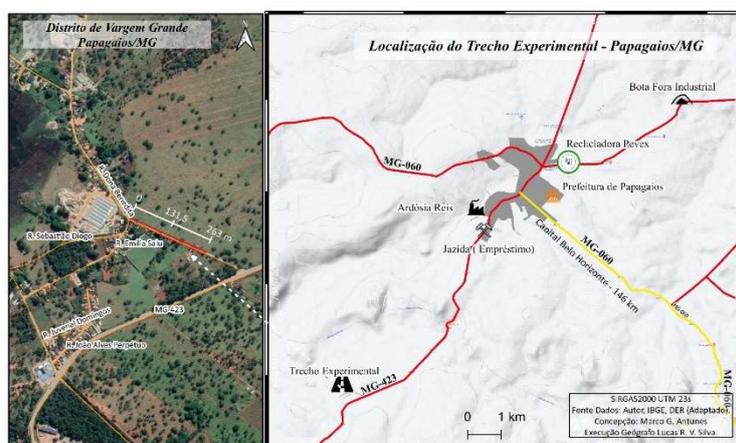


Figura 1: Mapa de localização do trecho Experimental.

REVISÃO TEÓRICA

Balbo define pavimento como:

O pavimento é uma estrutura não perene, composta por camadas sobrepostas de diferentes materiais compactados a partir do subleito do corpo estradal, adequada para atender estrutural e operacionalmente ao tráfego, de maneira durável e ao mínimo custo possível, considerados diferentes horizontes para serviços de manutenção preventiva, corretiva e de reabilitação, obrigatórios. (BALBO, 2007)

De acordo com Medina et al. (1994), as condições de trafegabilidade em que um pavimento se encontra estão associadas ao processo de deterioração ao longo de sua vida útil, pela passagem do tráfego de veículos. Ainda segundo os autores, a avaliação funcional (não destrutiva) e a estrutural (destrutiva ou não destrutiva) de pavimentos constituem métodos e critérios assertivos para diagnosticar essas condições.

Para Bernucci et al. (2010), a avaliação funcional está relacionada com a apreciação da superfície da pista de rolamento, pelo conforto proporcionado ao usuário. O desempenho da camada de revestimento ou capeamento asfáltico é função do inventário de defeitos e irregularidades levantado. No caso da avaliação estrutural do pavimento, segundo Nobrega (2003), pode-se obter a situação do seu estágio de conservação, o que norteará o processo de restauração da via. Nessa etapa, características como deformabilidade e

resistência à ruptura são então avaliadas, tendo por base a coleta de amostras, ensaios e testes de laboratório. A avaliação estrutural é complementar à avaliação funcional.

De acordo com a norma DNIT 006- PRO (2003), em uma avaliação funcional, os defeitos ou patologias observadas na superfície de pavimentos flexíveis e semirrígidos têm suas respectivas nomenclaturas associadas a dois grupos: (i) trincas por deformação permanente ou por fadiga e (ii) trincas não atribuídas à fadiga. No primeiro grupo, como trincas isoladas, têm-se trincas transversais curtas e longas (TTC; TTL), e como trincas interligadas, têm-se as denominadas 'jacaré', com e sem erosão nas bordas (J; JE). No segundo grupo, como trincas isoladas, têm-se aquelas decorrentes da retração térmica (TRR); e como trincas interligadas, aquelas formadas em 'bloco', com e sem erosão nas bordas (TBE; TB).

A referida norma DNIT 006- PRO (2003) apresenta, para 'outros defeitos', dois tipos de afundamento no pavimento: (i) plástico, no local (ALP) ou na trilha de roda (ATP); e (ii) de consolidação, no local (ALC) ou na trilha de roda (ATC). Ainda em 'outros defeitos', traz as patologias ondulação/corrugação (O), escorregamento (E), exsudação (EX), desgaste (D), 'painéis' (P) e remendos superficial (RS) e profundo (RP). A norma DNIT 005-TER (2003) discorre com precisa definição e ilustração sobre cada uma das patologias mencionadas no parágrafo anterior e apresenta para essas terminologias individualizadas (codificação e classificação).

Parâmetro fundamental na avaliação objetiva da superfície de pavimentos flexíveis e semirrígidos é o índice de gravidade global (IGG), que representa o somatório dos índices de gravidade individuais (IGI). Estes, por sua vez, estão associados à frequência relativa e ao fator de ponderação (severidade do dano) correspondente a cada ocorrência (patologia) levantada em cada estação (E) e num mesmo trecho homogêneo. A maioria dos defeitos é constatada visualmente, porém os afundamentos locais ou em trilhas de roda são levantados por meio da medição de flechas, com uso de uma trelíça metálica de alumínio, que dispõe de régua móvel graduada DNIT 006- PRO (2003) Mostra-se na Tabela 1 o enquadramento do estágio de degradação do pavimento segundo o IGG.

Tabela 1: Índice de degradação do pavimento em função do IGG.

Conceitos	Limites - IGG
Ótimo	$0 < IGG \leq 20$
Bom	$20 < IGG \leq 40$
Regular	$40 < IGG \leq 80$
Ruim	$80 < IGG \leq 160$
Péssimo	$IGG > 160$

Fonte: DNIT 006- PRO (2003).

Para a segurança viária, o revestimento de concreto asfáltico (CA) em de pista de rolamento acabada deverá apresentar condições de superfície contra derrapagem DNIT 031-ES (2006). Nessa avaliação, duas propriedades são correlacionadas ao atrito pneu-pavimento: micro e macrotexturas do revestimento ou da capa asfáltica. Segundo BUCHARLES (2014), em razão de custos mais acessíveis e facilidade de locomoção dos equipamentos, sugere-se que sejam empregados os ensaios 'Pêndulo Britânico', para detecção da microtextura, conforme a norma ASTM – E 303 (1993), e 'Mancha de Areia', para detecção da macrotextura,

conforme a norma ASTM – E 965 (1996). O Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos DNIT 720-IPR (2006), Tabela 2, apresenta limites de segurança para essas condições.

Tabela 2: Avaliação das condições de aderência pneu-pavimento ou resistência à derrapagem.

Método da Mancha de Areia		Método do Pêndulo Britânico	
Textura superficial	Profundidade média HS (mm)	Classes	Valor de resistência à derrapagem VRD
Muito Fina ou Muito Fechada	$HS \leq 0,20$	Perigosa	< 25
Fina ou Fechada	$0,20 \leq HS \leq 0,40$	Muito Lisa	25 – 31
Média	$0,40 \leq HS \leq 0,80$	Lisa	32 - 39
Grossa ou Aberta	$0,80 \leq HS \leq 1,20$	Insuficientemente Rugosa	40 - 46
Muito Grossa ou Aberta	$HS > 1,20$	Medianamente Rugosa	47 - 54
		Rugosa	55 - 75
		Muito Rugosa	> 75
Limite sugerido: HS Profundidade Média 0,6mm < HS < 1,20mm (Textura Superficial Média a Grosseira)		Limite Sugerido: VRD ≥ 55 (Superfície Medianamente Rugosa a Rugosa)	

Fonte: DNIT 720-IPR (2006).

De acordo com Lima et al. (2016), a microtextura relaciona-se com a aspereza da superfície do agregado pétreo presente na camada de revestimento do pavimento, sendo uma propriedade mineralógica desse. A microtextura está diretamente relacionada aos efeitos da aquaplanagem viscosa, sendo importante na promoção da aderência pneu-pavimento em baixas velocidades (até 40 km/h). Por sua vez, a macrotextura relaciona-se simultaneamente com a aspereza na superfície do agregado, sua quantidade presente e faixa granulométrica do esqueleto mineral. A macrotextura é uma propriedade que influi diretamente no conforto ao rolamento, sendo importante na promoção da aderência pneu-pavimento em velocidades mais elevadas.

MATERIAIS E MÉTODOS

Materiais constituintes do trecho experimental

Os principais agregados pétreos de ardósia utilizados na pesquisa foram os resíduos do beneficiamento de ardósia (cacos, aparas e peças inutilizadas) na forma britada: brita 1, brita 0, brita 0 (matacão¹) e pó de pedra. Outro material especialmente importante foi o pó decantado (material de enchimento), que proveio da secagem da polpa (água e pó) do corte a úmido de peças de ardósia, durante o beneficiamento industrial, Figura 2. Para a capa asfáltica, o ligante utilizado foi o cimento asfáltico de petróleo (CAP 50/70).

Os materiais constitutivos da pista do trecho experimental, com importância secundária, foram os seguintes: bica corrida de ardósia (camada de base preexistente); cascalho quartizoso (camada de sub-base preexistente); solo argiloso do próprio subleito; e solo argiloso trazido de área de empréstimo de uma propriedade particular próxima da sede do município de Papagaios, localizada e com acesso pela rodovia MG 423 (estaca 65). Esta jazida foi catalogada como 'J - 10' pelo órgão rodoviário do Estado. Os solos integrantes

1 Segundo Chiodi Filho et al. (2014), 'as ardósias matacão são aquelas que não podem ser delaminadas em espessuras reprodutíveis'.

das camadas granulares do pavimento estão ilustrados na Figura 3.



Figura 2: Agregados pétreos utilizados na mistura asfáltica.



Figura 3: Solos utilizados nas camadas granulares do pavimento.

Tem-se, na Figura 4, o perfil do pavimento construído e liberado ao tráfego, com as camadas de revestimento, de base, de sub-base e de reforço do subleito assentadas no logradouro rua Dona Benedita, distrito de Vargem Grande, Papagaios, MG. A estrutura do novo pavimento foi constituída por revestimento: Mistura Asfáltica 1: brita 1 (10%), brita 0 (30%), pó de pedra (40%) e pó decantado (20%), perfazendo 864m², com 0,05m de espessura; e Mistura Asfáltica 2: brita 0 (matação – 40%), pó de pedra (45%) e pó decantado (15%), perfazendo 378 m², com 0,05m de espessura. As referidas misturas, com o ligante CAP (50/70), e mesmo teor (6%), foram preparadas em usina de asfalto de empreiteira instalada na região e levadas ao

trecho por caminhões-basculante. Base: brita 1 (20%), brita 0 (30%), pó de pedra (30%) e solo (argila) de empréstimo (20%), com espessura de 0,15m; Sub-base: brita 1 (20%), brita 0 (20%), pó de pedra (30%) e solo (argila) de empréstimo (30%), com espessura de 0,15m; e Reforço do subleito: bica corrida de ardósia e solo *in situ* (argila) do subleito, em proporções iguais, espessura de 0,20m. As camadas granulares foram misturadas em pista com uso de uma grade de disco.



Figura 4: Perfil do pavimento em estudo.

A composição mineralógica dos materiais, resíduos de ardósia, utilizados na pesquisa está apresentada na Tabela 3. O ensaio foi realizado no Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear -CDTN, em Belo Horizonte, MG, com uso do aparelho difratômetro de raios X, marca Rigaku, modelo D MAX ÚLTIMA automático.

Tabela 3: Difractometria de Raios X.

Material ardósia em pó (duas amostras por espécie)	Método do pó					
	Componentes das fases cristalinas principais identificadas					
Procedência: Ardósia Reis, Papagaios-MG	Quartzo %	Calcita %	Muscovita %	Clorita %	Albita %	Clinocloro %
Ardósia resíduo matacão	45,6	1,4	3,9	26,3	20,2	2,6
Ardósia resíduo tipo exportação	35,0	15,6	11,0	16,5	15,2	6,7
Ardósia resíduo pó decantado	41,5	-	10,9	25,9	16,8	4,9

Fonte: Antunes et al. (2020).

As características físicas e químicas dos agregados de ardósia, brita 1 e brita 0 (graúdo), pó de pedra (miúdo) e pó decantado (material de enchimento) objeto da pesquisa estão apresentadas na Tabela 4. A massa específica do agregado identifica a rocha de origem Pinto et al. (2015). A forma dos agregados influi na resistência, trabalhabilidade e compactação dos materiais, devendo ser evitados aqueles com formato alongado ou achatado Bernucci et al. (2010). Um agregado com alta porosidade demandará maior quantidade de ligante e, se contiver porosidade variável, dificultará a dosagem asfáltica, sendo em princípio não recomendável seu uso Bernucci et al. (2010). A ocorrência de finos plásticos na fração agregados miúdos é indesejável, pois induzem o surgimento do fenômeno retração e inchamento quando presentes nas misturas asfálticas Pinto et al. (2015). A degradação por impacto, abrasiva e mecânica dos agregados, após

ensaios, procura estimar os limites aceitáveis para sua utilização frente à passagem do tráfego Marques (2018). Agregados com boa adesividade a ligante asfáltico e satisfatório desempenho mecânico à ação da água, devem ser preferencialmente escolhidos Bernucci et al. (2010).

Tabela 4: Características físicas e químicas dos agregados de ardósia.

Ensaio	Brita 1	Brita 0	Pó de pedra	Pó de cantado
Massa específica real (g/cm ³)	2,767	2,765	2,771	2,791
Massa unitária (g/cm ³)	1,371	1,380	1,681	1,522
Índice de forma: ardósia, resíduo misturado	0,56 ('B')	0,49 ('D')		
Índice de forma: ardósia, resíduo matacão	0,74 ('B')	0,54 ('D')		
Absorção (%)	0,57			
Equivalente de areia (%)			76,9	
Abrasão Los Angeles (%)	17,6 ('B')			
Índice de degradação com ligante (IDML)(%)	1,34	1,34		
Índice de degradação sem ligante (IDM)(%)	2,1	2,1		
Durabilidade do agreg. (sulfato de magnésio) (%)	0,27			
Adesividade ao ligante (CAP 50/70)	Satisfatório	Satisfatório		
Dano por umidade induzida	0,94	0,94	0,94	0,94

Fonte: Antunes et al. (2020) (modificado).

As especificações técnicas necessárias à utilização do novo programa nacional de dimensionamento de pavimentos flexíveis - MeDiNa, no âmbito da mecânica de pavimentos, pertinentes às Misturas Asfálticas 1 e 2, do revestimento, e dos solos-brita, pertinentes às camadas granulares, estão apresentadas nas Tabela 5 e 6.

Tabela 5: Parâmetros das misturas asfálticas – MeDiNa.

Especificações	Mistura Asfáltica 1	Mistura Asfáltica 2
Espessura (cm)	5,0	5,0
Coefficiente de Poisson	0,35	0,35
Contato (com a camada de base)	Não aderido	Não aderido
Módulo resiliente (linear) (MPa)	8.182	6.313
Ligante asfáltico (CAP)	50/70	50/70
Massa específica (g/cm ³)	2,432	2,420
Resistência à tração (MPa)	1,66	1,44
Teor de asfalto (%)	5,70	5,70
Volume de vazios (%)	3,59	3,69
Faixa granulométrica DNIT 031- ES (2006)	'C'	'C'
Abrasão Los Angeles (%)	17,6	17,6
Norma (DNIT)	031/2006-ES	031/2006-ES
Fadiga	$Y = 7,2E-17e^{-4,6730}$	$Y = 8,2E-18e^{-5,0813}$

Fonte: Antunes et al. (2020) (modificado).

Tabela 6: Parâmetros das misturas solo-britas de ardósia - MeDiNa

Especificações	Base	Sub-base	Ref. Subleito
Espessura (cm)	15,0	15,0	0,20
Massa específica (g/cm ³)	2,224	2,108	1,816
Umidade ótima (%)	5,40	7,50	13,3
Energia de compactação	Proctor modificado	Proctor intermediário	Proctor intermediário
Abrasão Los Angeles (%)	17,6	17,6	17,6
Faixa granulométrica	'C' DNIT- 141-ES (2010)	'D' DER-SP 008/2015	-
Coefficiente de Poisson	0,35	0,35	0,45
Contato entre camadas	Não aderido	Não aderido	Não aderido
Módulo Resiliente	Não linear	Não linear	Não linear
Exp. do Módulo Resiliente	$132,25 \cdot \sigma_3^{0,118} \cdot \sigma_d^{-0,4306}$	$398,26 \cdot \sigma_3^{0,4244} \cdot \sigma_d^{-0,2541}$	$181,94 \cdot \sigma_3^{0,4132} \cdot \sigma_d^{-0,4406}$
Exp. da Def. Permanente	$0,001 \cdot \sigma_3^{-2,745} \cdot \sigma_d^{-0,266} \cdot N^{0,093}$	$0,012 \cdot \sigma_3^{-1,490} \cdot \sigma_d^{-0,230} \cdot N^{0,077}$	$0,02 \cdot \sigma_3^{-1,595} \cdot \sigma_d^{-0,218} \cdot N^{0,067}$

Fonte: Antunes et al. (2020) (modificado).

Equipamentos e programas utilizados na avaliação objetiva, funcional e estrutural (não destrutiva) da pista do trecho experimental

Para avaliação funcional da pista do trecho experimental foi utilizado o equipamento FWD - *Falling Weight Deflectometer* DNER 273-PRO (1996), marca SWECO, modelo PRIMAX – 1500, de propriedade da empresa SOLOCAP (calibrado por representante do fabricante), equipado com 14 geofones (dispostos de 0 a 2,1m) e constituído basicamente de um trailer (L x W x H: 4,30m x 1,84m x 1,30m). Dispõe de duplo eixo de rodagem simples, o que favorece a distribuição e a estabilização da carga total do equipamento sobre a superfície de rolamento. O pulso de carga dinâmico é aplicado por um martelo sobre uma placa (com 300 mm de diâmetro) e pode variar de 7 a 150kN, a critério da situação específica (para as rodovias brasileiras, o padrão de carga é 41kN). As deformações recuperáveis, chamadas deflexões, são lidas e convertidas por software próprio do equipamento para unidade padrão de deflexão ($\times 0,01\text{mm}$).

As deflexões máximas medidas pelo FWD são capazes de indicar como o pavimento irá se comportar em relação à fadiga e ao estado de fissuração das camadas asfálticas. Quando se mede a deflexão em vários pontos, obtém-se a linha de influência, denominada bacia de deflexão. Essa bacia consiste basicamente no conjunto de deslocamentos frutos do efeito de um carregamento aplicado à estrutura do pavimento, que se dissipa à medida que se afasta do ponto de aplicação da carga. Com a utilização da bacia de deflexão, juntamente com as propriedades das camadas, é possível fazer-se o processo inverso (chamado de retroanálise) e obter os módulos de resiliência das camadas *in situ*, para que sejam utilizados posteriormente em projetos de dimensionamento de reforços Rocha (2020).

Para o processo de retroanálise de bacias deflectométricas obtidas pelo equipamento FWD, foi utilizado o programa de retroanálise brasileiro, BackMeDiNa. Para cada segmento viário foram calculadas as deflexões características, de acordo com Balbo (2007), onde estas são obtidas pela soma da deflexão média com o desvio padrão do segmento homogêneo. Durante o processo, é necessário que o usuário entre com algumas informações no programa. São necessários os *inputs* das camadas (espessura, obtida mediante abertura de poços de sondagem, ou do projeto; coeficiente de Poisson; e módulos sementes), do carregamento (força utilizada pelo FWD) e os dados da bacia de deflexão. O usuário opera o programa até que a bacia modelada se aproxime da bacia de campo para um erro aceitável. O software aceita três tipos de erros: maior do que $10\mu\text{m}$ (representado pela cor vermelha); entre $5\mu\text{m}$ e $10\mu\text{m}$ (cor amarela) e menor do que $5\mu\text{m}$ (cor verde).

Outros equipamentos utilizados na avaliação objetiva e funcional do trecho experimental foram uma treliça de alumínio DNIT 006-PRO (2003), padronizada, com 1,20m de comprimento na base, dotada de régua móvel posicionada em seu ponto mediano, para medição (em milímetros) de flechas em trilha de roda (deformação permanente) e uma trena de roda, com marcador analógico, Figura 5. Estas medidas são executadas nas trilhas de roda interna (TRI) e externa (TRE), anotando-se o maior valor medido em cada trilha. Caso a estação apresente remendo ou panela que inviabilize a medida da flecha, a treliça pode ser deslocada, com a condição de se obter uma flecha no interior da área previamente demarcada.

Para a verificação do dimensionamento do novo pavimento como todo, pelo MeDiNa, o usuário deverá entrar com alguns dados associados às camadas, entre outros, como: espessura, módulo de resiliência (linear ou não linear), coeficientes de Poisson; informações relacionadas ao tráfego; e propriedades da mistura asfáltica a ser utilizada. O programa processa rotinas até que as espessuras das camadas promovam um pavimento que não atinja um limite de área trincada permitida (30%) ao fim da vida de projeto (10 anos).



Figura 5: Equipamentos utilizados na fase de avaliação objetiva, funcional e estrutural (não destrutiva).

Equipamentos utilizados na avaliação estrutural do trecho experimental

Na avaliação estrutural da camada de revestimento, Misturas Asfálticas 1 e 2, foram feitas extrações de corpos de prova na pista do trecho experimental, mediante uso de sonda rotativa, como forma de se conhecer suas efetivas estruturas internas, visualizados na figura 6. Para isso, foram realizados os ensaios de teor de betume DNER 053-ME (1994), densidade aparente DNER 117-ME (1994), resistência à tração por compressão diametral DNIT 136-ME (2018) e estabilidade Marshall DNER 043 (1995).



Figura 6: corpos de prova retirados em pista e avaliados em laboratório.

Avaliação da segurança viária

A segurança viária contra a derrapagem de veículos em pista molhada, no trecho experimental, foi avaliada por meio da detecção da micro e macrotexturas dos revestimentos asfálticos então empregados. Em campo, dois ensaios feitos, um pelo método 'Pêndulo Britânico'; outro pelo método 'Mancha de Areia'.

Para determinação da microtextura do revestimento foi utilizado o equipamento Pêndulo Britânico. O ensaio foi orientado pela norma ASTM – E 303-93. Basicamente, o ensaio consisti em liberar o braço pendular do equipamento, munido de uma sapata de borracha na extremidade livre, e cujo resultado do atrito com a superfície previamente molhada do pavimento mostrava a graduação VRD indicada por um ponteiro articulado ao braço pendular, Figura 7.

Quanto à determinação da macrotextura, esta seguiu a norma ASTM – E 965-96. Os aparatos utilizados foram, areia uniforme, arredondada, passante na peneira nº 60 (0,250mm) e retida na peneira nº 80 (0,177mm), denominada 'areia calibrada', um recipiente de metal com um volume interno predeterminado de 25000mm³ (a ser preenchido com areia), e cuja base cilíndrica, de 75mm, serviu para espalhamento da areia, mediante movimentos circulares, em apenas um sentido, perfazendo um 'círculo', até o aparecimento das extremidades dos agregados. O diâmetro médio do 'círculo' foi determinado por meio de quatro medições ortogonais, duas a duas, com uma régua padronizada. Antes de se iniciar o ensaio, a superfície do pavimento foi devidamente limpa e a área de trabalho protegida por um dispositivo contra vento e turbulência do tráfego, Figuras 7.



Figura 7: Ensaios para determinação da micro e macrotextura.

Estratégia para o levantamento em campo

A avaliação objetiva da superfície da pista do trecho experimental seguiu as orientações da norma DNIT 006-PRO (2003) (previsão de 13 Estações, Estacas 1 a 13), ao longo de toda a extensão da pista do trecho experimental. As Estações foram inventariadas a cada 20m, alternadas entre as faixas de tráfego. A superfície de avaliação da Estação, com 18m², compreendeu demarcatória de 3m antes e 3m depois, por 3m (largura da pista). A Figura 8 mostra a localização das Estações consideradas como também os Subtrechos

(Subt. 01 a 08) previstos na pista experimental. As estruturas das camadas do pavimento nos Subtrechos 1 a 4 e 8 são inteiramente novas. Nos Subtrechos 5 e 6, apenas o revestimento é novo (base e sub-base preexistentes); e no Subtrecho 7, base e sub-base preexistentes foram capeados com concreto asfáltico (agregado brita de gnaiss, padrão tradicional).

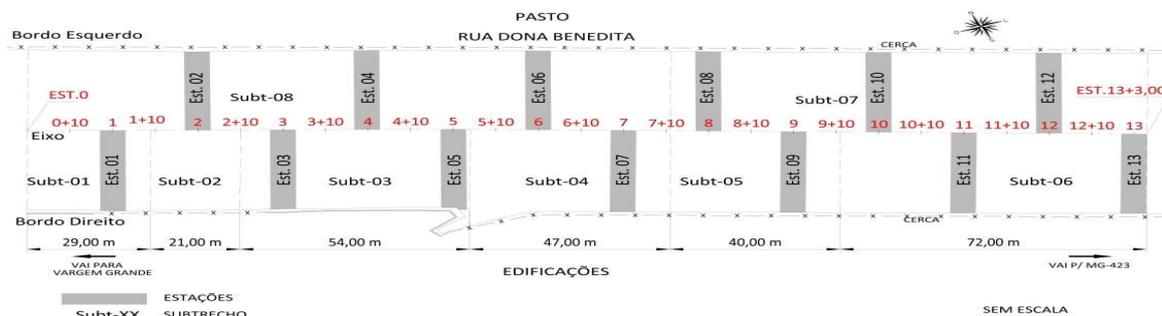


Figura 8: Pista do trecho experimental demarcada com Subtrechos e Estações. Mistura asfáltica 1: Subt. 01, 02, 04, 05 e 08 (área total = 864m²) Mistura asfáltica 2: Subt. 03 e 06 (área total = 378m²) Mistura asfáltica DEER-MG, padrão local: Subt. 07 (área total = 336m²).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Avaliação funcional objetiva

A pista do trecho experimental, nesses três anos em que foi observada, apresentou basicamente apenas um defeito, com a designação técnica denominada trinca interligada ‘jacaré’. No caso, um defeito atribuído à fadiga, com 5m de extensão por 1m de largura (5m²), e com abertura superior a 1,0mm, mas sem erosão nas bordas. Demais defeitos foram dois afundamentos de consolidação de trilha externa, com 5 e 3 mm, medidos com trelça de alumínio. O inventário de defeitos registrado *in loco* está consolidado na Tabela 7 e, na Tabela 8, a marcha de cálculo para obtenção do índice de gravidade global.

Tabela 7: Inventário do estado da superfície da pista do trecho experimental.

ESTAÇÕES			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
TIPOS - PATOLOGIAS - FAIXAS			D	E	D	E	D	E	D	E	D	E	D	E	D
2	J	Trincas Interligadas ‘Jacaré’ sem Erosão	X												
4	ATC	Afundamento de Consolidação da Trilha	X						X						
TRI	mm	Afundamento Trilha Interna (mm)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
TRE	mm	Afundamento Trilha Externa (mm)	5	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0

Fonte: Bernutti et al. (2010) (3ª reim.) (adaptado); DNIT 006-PRO (2003)(adaptado)

Tabela 8: Cálculo do Índice de Gravidade Global (IGG).

Tipo	Natureza do defeito	Frequência absoluta	Frequência absoluta considerada	Frequência relativa	Fator de ponderação (fp)	Índice de gravidade individual (IGI)
1	FI, TTC, TTL, TLC, TLL, TRE	0		0,00	0,20	0,00
2	(FC - 2) J, TB	1		7,69	0,50	3,85
3	(FC - 3) JE, TBE	0		0,00	0,80	0,00
4	ALP, ATP, ALC, ATC	0		0,00	0,90	0,00
5	O, P, E	0		0,00	1,00	0,00
6	EX	0		0,00	0,50	0,00
7	D	0		0,00	0,30	0,00
8	R	0		0,00	0,60	0,00
9	Média aritmética dos valores médios das flechas medidas em milímetros nas TRI e TRE	TER = 0,80	TRI = 0,00		F = 0,40	0,53

10	Média aritmética das variâncias das flechas medidas em ambas as trilhas	TERv = 0,18	TRiv = 0,00	FV = 0,09	0,09
Número total de ESTAÇÕES		N = 13	Σ IGI = IGG IGG = 4,47	CONCEITO	ÓTIMO

Fonte: Bernutti et al. (2010) (adaptado); DNIT 006-PRO (2003) (adaptado).

Considerando a área da superfície da pista com emprego da Mistura Asfáltica 1, em 864m², onde ocorreu o defeito trinca interligada 'jacaré', e sendo 5m² a área trincada, tem-se então o percentual de área trincada de 0,58%. Antunes et al. (2020), mediante uso do Programa MeDiNa, associado ao mesmo trecho experimental, encontraram, para o período de projeto de 10 anos, o percentual de área trincada (trinca de fadiga) de 1,5% e deformação permanente de 0,00mm, para a Mistura asfáltica 1 e 1,4% de área trincada e 0,00mm para deformação permanente, para a Mistura asfáltica 2. Segundo DNIT (2020) para o tipo de via 'Sistema Local', confiabilidade de 65%, ao longo do mesmo período, é de 30% de área trincada e 20mm para deformação permanente.

Avaliação estrutural não destrutiva

Na avaliação estrutural do pavimento, foi utilizado o equipamento FWD, onde foram medidas as deflexões (14 geofoenes) a cada 20m. O segmento foi inicialmente dividido em dois: na direção de ida (sentido estaca 01 a 13) e direção de volta (direção estaca 12 à estaca 02) de acordo com a Figura 8. Cada uma das direções então foi dividida em subtrechos de acordo com os materiais utilizados, que foram utilizados como segmentos homogêneos. No total, na direção de ida foram inventariados 6 Subtrechos (denominados Subtrechos 01, 02, 03, 04, 05 e 06) e na direção de volta 2 subtrechos (denominados 07 e 08). A Figura 9 ilustra as bacias deflectométricas características de cada um dos Subtrechos.

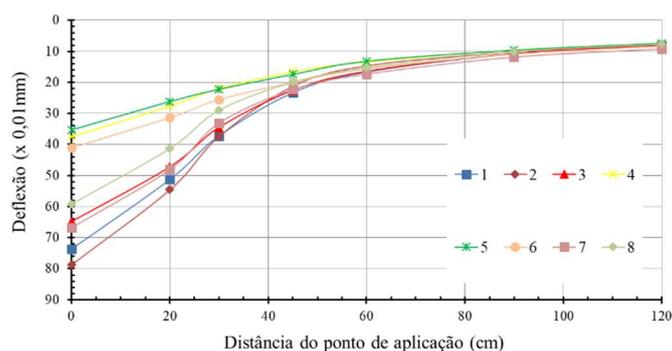


Figura 9: Bacias de deflexão características dos 8 Subtrechos.

De acordo com as bacias deflectométricas percebe-se que os Subtrechos 04, 05 e 06 apresentaram as menores deflexões, o que pode indicar estruturas mais rígidas do que as demais. Já o Subtrecho 07, que foi construído com mistura asfáltica tradicional, foi a que apresentou maiores valores absolutos de deflexão, o que pode simbolizar problemas estruturais ou estruturas pouco rígidas. Os Subtrechos 01 e 02 apresentaram deflexões muito similares, o que pode ser explicado por terem sido construídos com o mesmo material asfáltico. Em vista de um melhor entendimento sobre a rigidez das camadas, as bacias foram retroanalisadas pelo software BackMeDiNa até o menor erro possível. A Tabela 9 mostra os módulos de

resiliência retroanalizados de cada camada, para os oito Subtrechos.

Tabela 9: Módulos retroanalizados dos oito subtrechos.

Módulo de Resiliência – Retroanalizado (MPa)					
Subtrecho	Parâmetro	Revestimento	Base	Sub-Base	Subleito
01	MR	3.754	443	452	121
	s	293	55	17	6
	CV (%)	8%	12%	4%	5%
02	MR	4.511	1.100	1.069	131
	s	2.106	991	751	10
	CV (%)	47%	90%	70%	8%
03	MR	6.917	1.398	1.667	127
	s	1.189	808	1.459	8
	CV (%)	17%	58%	88%	6%
04	MR	7.394	1.878	4.774	146
	s	2.224	588	1.999	75
	CV (%)	30%	31%	42%	52%
05	MR	7.461	3.221	4.714	149
	s	3.738	609	2.333	12
	CV (%)	50%	19%	49%	8%
06	MR	10.172	3.559	3.959	165
	s	9.579	3.748	3.107	39
	CV (%)	94%	105%	78%	24%
07	MR	6.013	402	1.651	131
	s	903	182	551	17
	CV (%)	15%	45%	33%	13%
08	MR	8.279	626	696	168
	s	2.024	189	110	26
	CV (%)	24%	30%	16%	16%

De acordo com os dados da referida tabela, nota-se que as estruturas em geral apresentaram camadas de base e sub-base muito rígidas. Assim como demonstrado pelas bacias de deflexão, pode-se observar que os Subtrechos 04, 05 e 06 apresentaram as camadas mais rígidas. Destacam-se ainda os Subtrechos 02, 03, 04, 05 e 06 que apresentaram camadas de base e sub-base com módulo de resiliência superiores a 1.000 MPa, o que simbolizam camadas significativamente rígidas. A elevada rigidez apurada nas camadas granulares deve-se provavelmente ao processo construtivo executado, que foi realizado com mistura de solos e agregados diretamente na pista (sem o uso de usinas) e com compactação excessiva em alguns pontos.

Avaliação estrutural destrutiva

A avaliação estrutural destrutiva foi empreendida a partir da retirada de corpos de prova da pista do trecho experimental com uso de sonda rotativa. Após o ensaio de extração de betume DNER (1994), observou-se que os agregados graúdos de ardósia, em ambas as misturas asfálticas, estavam íntegros (sem quebra, fendilhamento ou esmagamento), e o esqueleto mineral como um todo se mostrou com graduação densa, confirmando a distribuição granulométrica de projeto, Figura 10, que se manteve dentro da faixa C do DNIT 031-ES (2006). De acordo com Pinto et al. (2015), a distribuição granulométrica (densa) é uma característica que assegura estabilidade aos pavimentos em razão do maior atrito interno pela imbricação das partículas, desde a mais graúda a mais fina.

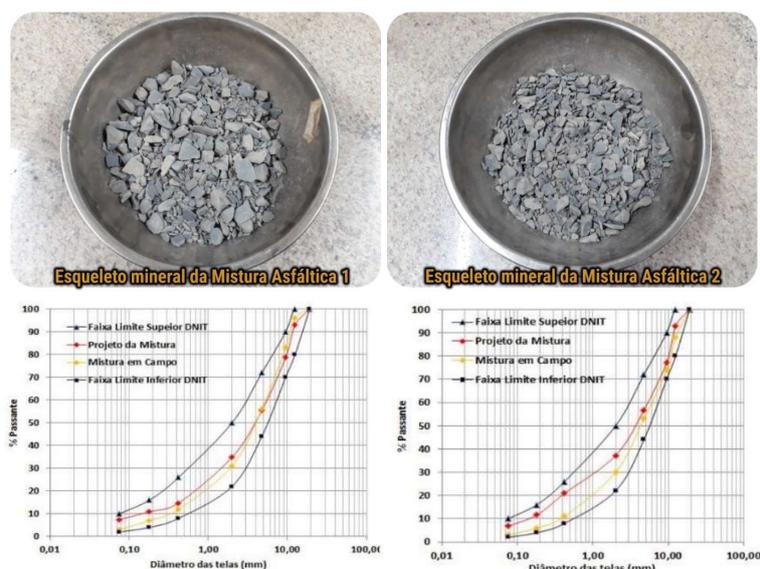


Figura 10: Esqueleto mineral das misturas asfálticas.

O resultado dos ensaios mecânicos, associados aos corpos de prova concernentes às Misturas Asfálticas 1 e 2, frente ao projeto das respectivas misturas, está apresentado na Tabela 10.

Tabela 10: Comparação entre parâmetros das misturas asfálticas.

Parâmetros	Mistura 1		Mistura 2	
	Projeto	Executado	Projeto	Executado
Densidade média	2,432	2,291	2,420	2,306
Resist. à Tração - RT (MPa)	1,66	1,20	1,41	1,10
Teor de Betume (%)	5,70	4,40	5,70	4,70
Estabilidade Marshall (kgf)	855	649	900	720
Módulo Resiliente - MR	8.182	11.606	6.313	8.296
MR/RT	4.929	9.672	4.477	7.542

Observa-se pelos valores de MR e MR/RT que as misturas asfálticas executadas também apresentaram valores de rigidez maiores que os de projeto, sobretudo a primeira. Uma provável causa seria o teor de asfalto efetivamente praticado no campo que apresentou valores menores que os de projeto. Menores teores de asfalto (em relação ao valor ideal de projeto) podem deixar as misturas mais rígidas. O inverso (misturas mais flexíveis) ocorre quando o teor praticado é superior ao de projeto.

Segurança viária

A segurança contra derrapagem, prevista em especificação de serviço para concreto asfáltico DNIT 031-ES (2006), foi avaliada pelos ensaios de Mancha de Areia e Pêndulo Britânico, em conformidade com o disposto no Manual de Restauração de Pavimentos Asfálticos DNIT 720-IPR (2006), e cujos resultados estão mostrados na Tabela 11.

Tabela 11: Resultado dos ensaios de Mancha de Areia e Pêndulo Britânico.

Estação	Mistura	Método Mancha de Areia		Método do Pêndulo Britânico	
		HS (mm)	Textura Superficial	VRD	Classes
1 a 13	1, 2 e 3	0,7	Média	42	Insuficientemente Rugosa
1-LD	Mistura 1	0,9	Grossa/Aberta	42	Insuficientemente Rugosa
2-LE	Mistura 1	1,2	Grossa/Aberta	41	Insuficientemente Rugosa
3-LD	Mistura 2	0,8	Média	44	Insuficientemente Rugosa

5-LD	Mistura 2	1,4	Muito Grossa/ Aberta	35	Lisa
6-LE	Mistura 1	0,9	Grossa/Aberta	48	Medianamente Rugosa
7-LD	Mistura 1	1,1	Grossa/Aberta	51	Medianamente Rugosa
8-LE	Mistura 3	0,4	Fina/Fechada	58	Rugosa
9-LD	Mistura 1	0,9	Grossa/Aberta	58	Rugosa
10-LE	Mistura 3	0,4	Fina/Fechada	48	Medianamente Rugosa
11-LD	Mistura 2	0,8	Média	51	Medianamente Rugosa
12-LE	Mistura 3	0,6	Média	52	Medianamente Rugosa
13-LD	Mistura 2	0,7	Média	39	Lisa
Média Geral do Trecho		0,8	Média	42	Insuficientemente Rugosa
Média Mistura 1		0,7	Média	48	Medianamente Rugosa
Média Mistura 2		1,0	Grossa/Aberta	42	Insuficientemente Rugosa
Média Mistura 3		0,5	Média	53	Medianamente Rugosa

Nota: Mistura 3 (CAP 20, agregados britados de gnaïsse); enquadramento na antiga faixa 313 do DNER (1997), substituída pela norma DNIT 031-ES (2006).

Com relação à macrotextura, que avalia a capacidade drenante da água localizada entre o pneu e o pavimento, a referida publicação DNIT 720-IPR (2006) sugere como limite seguro que a profundidade média da textura superficial do pavimento, medida pela altura da areia, 'HS', fique entre 0,6 e 1,20mm ('textura superficial média a grosseira'), o que foi atendido em pista por um todo (média geral do trecho), como também e individualmente pela Mistura Asfáltica 1 (agregados de ardósia) e Mistura Asfáltica 2 (agregados de ardósia); contudo não foi atendida pela Mistura Asfáltica 3 (agregados de gnaïsse, material convencional).

Quanto à microtextura, cuja medida escalar 'VRD' está associada ao grau de escorregamento ou derrapagem na superfície da pista de rolamento do novo pavimento, em que se afere a aderência entre o pneu e o pavimento, a publicação DNIT 720-IPR (2006) preconiza como limite de seguro que o VRD seja maior ou igual 55 ('superfície medianamente rugosa a rugosa'). Por esse parâmetro de avaliação, obtido em campo pelo equipamento Pêndulo Britânico, a pista como um todo está insuficientemente rugosa (VRD = 42). Para a Mistura Asfáltica 1, tem-se que a pista está medianamente rugosa (VRD = 48); para a Mistura Asfáltica 2, a pista está no mesmo padrão como de todo o trecho (VRD = 42); e para Mistura Asfáltica 3 (agregado de gnaïsse, convencional) a pista está no mesmo padrão que a Mistura Asfáltica 1 (VRD = 48).

CONCLUSÕES

Os agregados britados de ardósia, constituintes do novo pavimento do trecho experimental, mostraram-se íntegros após o transcurso de três anos, não tendo sido observado nestes quebra, esmagamento ou mesmo fendilhamento, seja decorrente do tráfego de veículos, com suas cargas cíclicas, que impõe efeito sinérgico de peso e vibração, seja por eventual agressividade química do meio. A característica visual (lamelar) do resíduo (brita 0) não é um impeditivo para seu uso rodoviário, uma vez que esse agregado se provou resistente. Registra-se que o material britado de ardósia, brita 1 e brita 0 (Matacão), apresentaram índice de forma (IF) maior que 0,5.

O bom desempenho do pavimento da pista do trecho experimental, ao longo de 3 anos, demonstrou que os agregados britados de ardósia, em mistura solo-brita, nas camadas reforço do subleito, sub-base e base, proporcionaram satisfatória resistência e rigidez às camadas granulares e, com isso, não contribuiu para que houvesse deformação permanente ao nível de carga e tráfego impostos.

Da mesma forma, ficou evidenciado que as Misturas asfálticas 1 e 2 apresentaram boa trabalhabilidade e afinidade conjuntas, não repercutindo para ocorrência de defeitos como deformação plástica, escorregamento, erodibilidade, exudação e trincas isoladas ou interligadas. Não tendo sido possível constatar nesse período de 3 anos qualquer aspecto positivo ou negativo entre essas misturas aplicadas em campo, embora a Mistura 2 tenha se mostrado menos rígida em projeto e execução. Os resultados obtidos em campo, até o momento, quanto ao percentual de área trincada (trinca de fadiga) e deformação permanente (afundamento em trilha de roda), estão dentro do prognóstico do MeDiNa.

E com relação à segurança viária, as Misturas Asfálticas 1 e 2, não se mostraram perigosas à derrapagem, sejam em velocidades baixas, ou mesmo em velocidade mais elevadas; não diferindo daquela com material tradicional. Portanto, os agregados de ardósia foram testados quanto à resistência mecânica, rigidez estrutural, trabalhabilidade conjunta com o ligante asfáltico CAP 50/70 em mistura a quente (sem necessidade de uso de dope) e, ao longo de três anos, sem tornar a pista escorregadia por ter o agregado natureza lamelar.

Sugere-se aprimorar o atual estágio de britagem na região de ocorrência de ardósia com emprego do britador de cone (terceiro estágio), ou mais especificadamente, o britador de impacto vertical (quarto estágio) denominado VSI (*Vertical Shaft Impact*), que representa o estado da arte no gênero, torna os agregados minerais com forma as mais cúbicas possível. Agregados cúbicos concorrem para uma significativa redução do teor de ligante (economia), uma vez que apresentam superfície específica menor, redução na utilização de material de enchimento, além de conduzir a melhores valores de resistência mecânica. Essa iniciativa tornará o material britado de ardósia mais competitivo e aceito, reduzirá a exploração de novas pedreiras de materiais convencionais, com ganhos para o meio ambiente.

REFERÊNCIAS

ANTUNES, M. A. G.; GUIMARÃES, A. C. R.; MARQUES, G. L. O.. **Uma solução viável para a reciclagem de resíduos industriais de ardósia em pavimentação**. Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais, v.11, n.4, p.236-254, 2020.

ASTM. American Society of Testing Materials. **ASTM E 965-96**: standard test method for measuring pavement macro texture depth using a volumetric technique. Washington, 2001.

ASTM. American Society of Testing Materials. **ASTM E 303-93**: standard test method for measuring surface frictional properties using the British Pendulum tester. USA, 2003.

BALBO, J. T.. **Pavimentação asfáltica**: materiais, projetos e restauração. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B.. **Pavimentação asfáltica**: formação básica para engenheiros. Rio de Janeiro: PETROBRAS: ABEDA, 2010.

BUCHARLES, L. G. E.. **Critérios para avaliação pericial da macro e microtextura de pavimento asfáltico em local de**

acidente de trânsito. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014.

CHIODI FILHO, C.; CHIODI, D. K.. **Plano de ação para sustentabilidade do setor de rochas ornamentais**: ardósia em papagaios. Fundação Estadual do Meio Ambiente – FEAM 2014.

CDTN. Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear. Serviço de Tecnologia Mineral. **SETEM-E007**, 2018.

DNER. Departamento Nacional Estradas de Rodagem. **PRO 273**. Determinação das deflexões utilizando o deflectômetro de impacto tipo 'falling weight deflectometer – FWD'. DNER, 1996.

DNER. Departamento Nacional Estradas de Rodagem. **ME 043**. Misturas betuminosas a quente – ensaio Marshall. DNER, 1995.

DNER. Departamento Nacional Estradas de Rodagem. **ME 117**. Mistura betuminosa – determinação da densidade aparente. DNER, 1994.

DNER. Departamento Nacional Estradas de Rodagem. **ME 053**. Misturas betuminosas – percentagem de betume. DNER,1994.

DNIT. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. **Manual de Utilização do programa MeDiNa**. DNIT, 2020.

DNIT. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **MeDiNa, Método de Dimensionamento Nacional de Pavimentos**. Versão Beta 1.1.2.0 (abr./2019). Brasília: DNIT, 2019.

DNIT. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **Pavimentos flexíveis: Concreto asfáltico - Especificação de serviço**. 2006.

DNIT. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **IPR 720**. Manual De Restauração De Pavimentos Asfálticos. 2 ed. Rio de Janeiro, 2006.

DNIT. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **006 - PRO**. Avaliação objetiva da superfície de pavimentos flexíveis e semirrígidos: Procedimento. 2003.

DNIT. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **005 - TER**. Defeitos nos pavimentos flexíveis e semirrígidos- Terminologia, 2003.

DNIT. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes. **ME 136**. Pavimentação asfáltica: Misturas asfálticas – Determinação da resistência à tração por compressão diametral. 2018.

HENDRIKS, C. F.; NIJKERK, A. A.; KOPPEN, A. E. V.. **O ciclo da construção**. Brasília: Universidade de Brasília, 2007.

LIMA, C. D. A.; MELO, R. A.. Avaliação da Segurança pela Resistência à Derrapagem: Estudo de Caso na Rodovia PB - 057. In: ANPET - CONGRESSO DE PESQUISA E ENSINO EM

TRANSPORTES, 30. **Anais**. Rio de Janeiro, 2016.

PINTO, S.; PINTO, I. E.. **Pavimentação asfáltica: conceitos fundamentais sobre materiais e revestimentos asfálticos**. Rio de Janeiro: LTC, 2015.

MARQUES, G. L. O.. **Notas de aula da Disciplina Pavimentação (TNR 075)**. Juiz de Fora: Universidade Federal de Juiz de Fora, 2018.

MEDINA, J. D.; MACÊDO, J. A. G.; MOTTA, L. M. G.; ALBERNAZ, C. A. V.. Utilização de Ensaio Defletométrico e de Laboratório para a Avaliação Estrutural de Pavimentos. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 28. **Anais**. 1994. p.595-625.

NÓBREGA, E. S.. **Comparação entre métodos de retroanálise em pavimentos asfálticos**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2003.

NUNES, M. C. M.; BRIDGES, M. G.; DAWSON, A. R.. Assessment Of Secondary Materials For Pavement Construction: Technical And Environmental Aspects. **Waste Management**, v.16, n.1-3, p.87-96, 1996.

ROCHA, M. L.. **Influência dos módulos de resiliência iniciais no procedimento de retroanálise de pavimentos flexíveis**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2020.

SARAIVA, S. L. C.. **Metodologia e análise experimental do comportamento geotécnico da estrutura de pavimentos rodoviários**. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2006.

SILVA, R. G. O.. **Caracterização de concreto asfáltico elaborado com rejeitos de minério de ferro do Quadrilátero Ferrífero**. Tese (Doutorado em Geotecnia) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2017.

A CBPC – Companhia Brasileira de Produção Científica (CNPJ: 11.221.422/0001-03) detém os direitos materiais desta publicação. Os direitos referem-se à publicação do trabalho em qualquer parte do mundo, incluindo os direitos às renovações, expansões e disseminações da contribuição, bem como outros direitos subsidiários. Todos os trabalhos publicados eletronicamente poderão posteriormente ser publicados em coletâneas impressas sob coordenação da **Sustenere Publishing**, da Companhia Brasileira de Produção Científica e seus parceiros autorizados. Os (as) autores (as) preservam os direitos autorais, mas não têm permissão para a publicação da contribuição em outro meio, impresso ou digital, em português ou em tradução.